

# 船用整体球墨铸铁活塞铸造及热处理工艺优化

刘宇, 杨志刚, 宋阳

(中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏常州 213011)

**摘要:** 采用MAGMA soft软件对某船用整体球铁活塞的铸造工艺进行了分析, 通过增加侧冒口、砂芯中空设计、铁丝固定等方法优化了铸造工艺。分析了不同热处理工艺对活塞基体组织的影响。解决了缩松、气孔、漂芯等质量问题, 增加了活塞基体珠光体含量。最终生产出质量符合要求的铸件, 同时提高了产品的可靠性与使用寿命。

**关键词:** 船用活塞; 工艺优化; 热处理; 缺陷解决

柴油机是整车动力的来源, 是铁路机车上最关键的部件之一, 相当于人体的“心脏”。而作为柴油机动力组件的活塞更是“心脏中的心脏”, 是柴油机中要求最高的零部件之一, 技术要求高, 铸造难度大<sup>[1]</sup>。球铁活塞产品的铸造难点有三点。第一, 结构复杂: 活塞为一体式结构, 燃烧室、冷却腔和活塞裙等多个部位整体铸造而成, 结构复杂、壁厚不均、热节多, 在生产过程中容易出现缩松、气孔等缺陷; 第二, 材质要求高: 球化等级要求1~2级, 即球化率 $\geq 90\%$ ; 珠光体含量要求 $\geq 85\%$ , 但活塞环槽部位厚度较大, 冷却慢, 珠光体含量 $\geq 85\%$ 存在较大难度; 第三, 探伤要求高: 铸件精加工后全表面磁粉探伤, 燃烧室、环槽、销孔等关键部位(50%以上区域)要求零缺陷。

## 1 铸件结构与工艺概述

### 1.1 铸件结构

某船用整体球铁活塞造型采用呋喃树脂砂工艺, 砂芯采用覆膜砂制芯, 铸件结构如图1所示。活塞质量为35.7 kg, 最小壁厚8 mm, 外形尺寸为 $\Phi 230 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。

### 1.2 工艺概述

横向造型竖向浇注, 底注式浇注系统, 顶部放置2个7/10发热保温冒口, 在铸件关键部位放置冷铁, 以满足磁粉探伤无缺陷的要求。采用3 t中频感应电炉熔炼, 出铁温度 $1\ 470 \sim 1\ 500 \text{ }^\circ\text{C}$ , 开浇温度 $1\ 380 \sim 1\ 420 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[2]</sup>。孕育方式采用包内一次孕育+球化后二次随流孕育。

## 2 存在的问题与原因分析

小批量生产阶段发现铸件存在漂芯缺陷, 环槽部位珠光体含量偏低(不足85%)。外观合格产品进行加工验证时发现顶部气孔和外圆缩松缺陷, 导致铸件综合成品率较低, 仅为60%左右。

### 2.1 外圆缩松

原铸造工艺活塞顶部虽有2个7/10发热保温冒口, 但活塞四周壁厚仅8 mm, 冷却较快, 活塞外圆先冷却, 导致顶部冒口对活塞外圆的补缩效果不佳。此外, 活塞高度超300 mm, 顶部的2个冒口需对整个活塞外圆进行补缩, 补缩距离较大, 难以保证组织完全致密。

作者简介:

刘宇(1981-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事铸造材料及工艺研究工作。电话: 15161191538, E-mail: liuyu.qs@crccgc.cc

中图分类号: TG143.5  
文献标识码: B  
文章编号: 1001-4977(2020)03-0269-04

收稿日期:

2019-09-02 收到初稿,  
2019-10-25 收到修订稿。

## 2.2 头部气孔

冷却腔芯为整体式实心设计，未作减重处理，覆膜砂砂芯发气量较大。其次，主体芯排气设计不合理，未设置排气通道，导致覆膜砂砂芯遇铁液后产生的气体无法及时排出，最终导致活塞顶部产生大量的气孔缺陷。

## 2.3 漂芯缺陷

飘芯缺陷的产生是由于原砂芯固定不稳固，如增加定位芯头长度、更换强力胶等方式固定效果不好，最终导致砂芯上浮，形成漂芯缺陷。

## 2.4 环槽部位珠光体量偏低

整体球铁活塞采用树脂砂造型，树脂砂保温效果好，降温慢。而且最小壁厚8 mm，但环槽部位壁厚超过25 mm，冷却速度慢，使得奥氏体主要以铁素体的形式发生共析转变，铁素体析出较多，珠光体析出较少<sup>[3]</sup>，珠光体量仅为45%左右，无法满足技术条件要求的 $\geq 85\%$ 。

# 3 铸造工艺优化

## 3.1 解决外圆缩松

图2a为改进前模拟结果，顶部放置2个保温冒口，外圆无冒口补缩。由模拟结果可知，顶部冒口对外圆的补缩效果不佳，外圆处补缩通道过早地与顶部冒口及横浇道断开，最终导致缩松缺陷的发生。针对以上情况，采取了如下的改进措施：

(1) 适当增加活塞外圆壁厚，加大顶部冒口对疏松部位的补缩通道的截面积<sup>[4]</sup>，避免补缩通道提前凝固；

(2) 在铸件外圆增加2个侧冒口<sup>[5]</sup>（图2b），并与横浇道相连组成热冒口，增加铁液补缩量，确保活塞外圆在冷却过程中得到足够的补缩。

## 3.2 解决头部气孔

针对头部气孔缺陷，采取了如下的改进措施：

(1) 将原整体式冷却腔芯一分为二，并将中间掏空，减少发气量，如图3a所示；

(2) 在主体芯上增加4个排气孔，增加排气通道，使铸造过程中产生的气体可以快速排出，如图3b；

(3) 在进油孔砂芯上增加芯骨，既增加芯头强度，又有利于排气<sup>[6]</sup>。

## 3.3 解决飘芯

为解决飘芯缺陷，尝试了增加定位芯头长度、更换强力胶等方式，但效果不佳。最终使用铁丝穿芯（图4），将铁丝从进油孔砂芯四个芯骨处穿进主体芯内并进行固定，解决了砂芯上浮问题，从根本上消除了飘芯缺陷。

# 4 热处理工艺优化

铸态球铁活塞环槽部位的珠光体量偏低，无法满足技术条件要求。图5为正火工艺后分别采取空冷和风冷得到的基体组织。采用空冷的正火工艺，基体组织中铁素体量有所降低，环槽部位珠光体量由45%提高

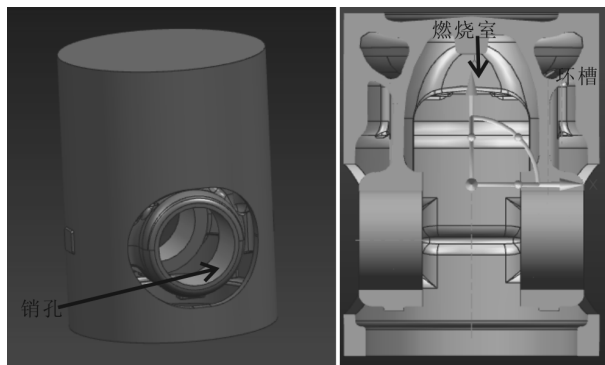
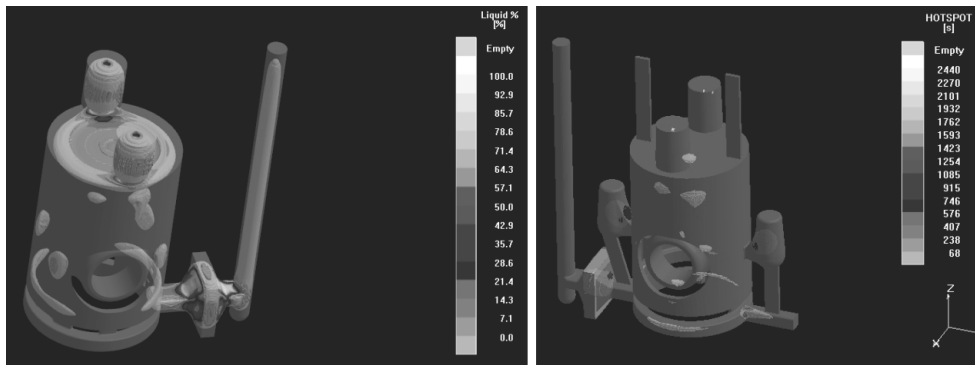


图1 铸件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of casting structure

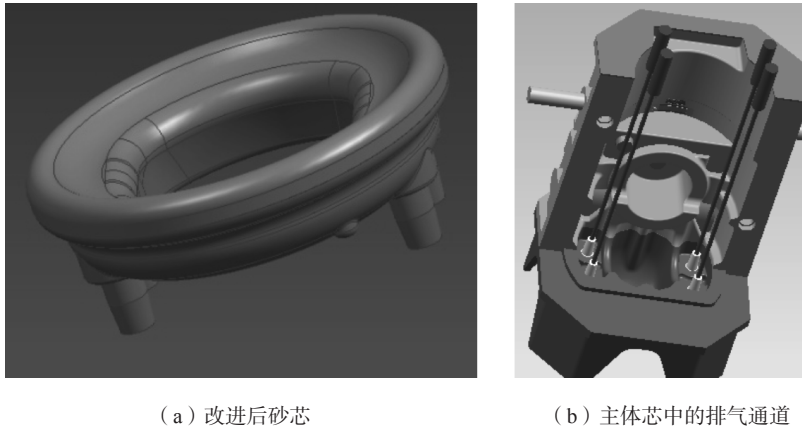


(a) 改进前

(b) 改进后

图2 铸造工艺改进前后模拟结果

Fig. 2 Simulation results of original and improved casting processes



(a) 改进后砂芯

(b) 主体芯中的排气通道

图3 改进后砂芯与主体芯中的排气通道

Fig. 3 The improved sand cores and exhaust passages in core box

至65%；采用风冷的正火工艺，过冷度进一步增加，环槽部位珠光体含量达到75%，但仍然无法满足珠光体量 $\geq 85\%$ 的要求；若采用普通淬火工艺，过大的过冷度导致应力集中，铸件极易产生裂纹，故普通淬火工艺也无法满足要求。

采用新型瞬时淬火工艺，即 $920\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温2 h后，利用水溶剂淬火至 $700\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右，然后空冷，得到的基体组织主要由95%珠光体+铁素体+少量索氏体构成，如图6。铸态及不同热处理工艺处理后环槽部位基体组织见表1。

不同热处理工艺水溶剂淬火+空冷的冷却方式不仅为珠光体形核提供了足够的相变动力，而且避免了奥氏体向索氏体甚至马氏体转变，过饱和奥氏体在瞬时淬冷给予的过冷度下大量共析出片层状铁素体及渗碳体，使得基体中珠光体量达到95%以上。

## 5 验证结果

铸造工艺优化后，进行了小批量试制24件，铸件粗加工后经目视检查无表面缺陷，且磁粉探伤全部合格。分别对铸件本体三个部位检测珠光体量，均达85%

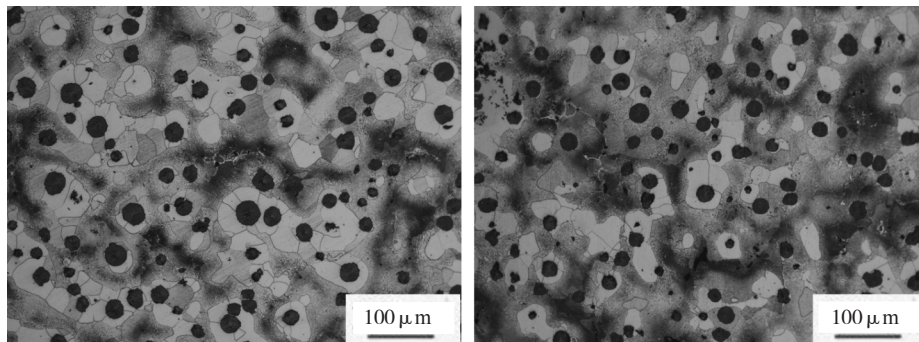


图4 铁丝穿芯工艺

Fig. 4 The process of fixing sand cores with iron wire

表1 不同状态环槽部位基体组织  
Table 1 Microstructure of ring groove region after different processes of heat treatment

序号	状态	环槽基体组织
1	铸态	45%P+F
2	正火+空冷	65%P+F
3	正火+风冷	75%P+F
4	瞬时淬火工艺	95%P+F



(a) 正火+空冷

(b) 正火+风冷

图5 正火+空冷及正火+风冷获得的环槽部位基体组织

Fig. 5 Microstructure of ring groove region in heat treated casting by normalization+AC and normalization+WC

以上。随后进行了批量生产120件，铸件外观合格，各部位均未发现缺陷，粗加工后磁粉探伤后综合成品率为94%，达到了预期目标。

## 6 结论

(1) 增加侧冒口工艺并使其与横浇道相连，并适当增加活塞外圆壁厚，可有效解决外圆缩松缺陷。

(2) 将冷却腔芯由整体式更改为分体式，局部掏空，并增加排气通道，增加芯骨等方式均可有效解决气孔缺陷。

(3) 采用铁丝穿芯，将铁丝从进油孔砂芯四个芯骨处穿进冷却腔芯内固定，可彻底解决飘芯缺陷。

(4) 新型瞬时淬火工艺，可有效增加基体珠光体含量，保证珠光体含量符合技术条件要求。

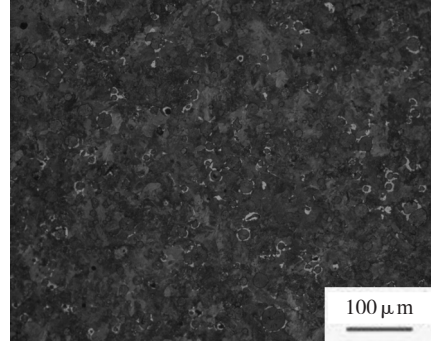


图6 环槽部位基体组织(瞬时淬火工艺)  
Fig. 6 Microstructure of ring groove region  
(instantaneous quenching)

### 参考文献:

- [1] 郭领军, 李贺军, 石振海. 内燃机活塞材料的研究及应用述评 [J]. 铸造, 2003, 52 (9): 657-660.
- [2] 邱立彬, 石作胜. 铁路货车用灰铸铁活塞的铸造工艺 [J]. 铸造, 2012, 61 (6): 676-678.
- [3] 魏兵, 袁森, 张卫华. 铸件均衡凝固技术及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 82-83.
- [4] 廖治东, 封雪平, 潘多龙, 等. NK230合金铸铁活塞裙铸造工艺设计与优化 [J]. 铸造, 2014, 63 (4): 407-408.
- [5] 邓晗, 封雪平, 杨志刚, 等. EMD灰铸铁活塞铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2016, 65 (3): 284-286.
- [6] 宋军辉, 封雪平, 崔青勇. 提高球铁活塞裙铸件表面质量的研究 [J]. 机车车辆工艺, 2010 (3): 10-11.

## Casting and Heat Treatment Process Optimization of a Marine Single-Piece Ductile Iron Piston

LIU Yu, YANG Zhi-gang, SONG Yang

(CRRC Qishuyan Locomotive&Rolling Stock Technology Research Institute, Changzhou 213011, Jiangsu, China)

### Abstract:

The casting process of a marine single-piece ductile iron piston was analyzed by using MAGMA software. The casting process was optimized by such methods as increasing side riser, middle hollow design for sand core and iron wire fixation. The influence of different heat treatment process on the matrix structure of piston was analyzed. The dispersed shrinkage, blowhole and core lift were eliminated, and the pearlite content of matrix was increased. Finally, the castings with the required quality were produced, and the reliability and service life of the products were improved.

### Key words:

marine piston; process optimization; heat treatment; defect elimination